

# TECNOLOGIA DE EDIFICACION, DISEÑO Y PRODUCCION

106-1

## I. DATOS DE DURABILIDAD Y PREVISIONES DE DURACION DE VIDA UTIL.

### LA DURABILIDAD Y EL CONCEPTO DE RENDIMIENTO

Ponencias: **L. W. Masters** y **K. Blach**,  
Dinamarca  
**E. J. Gibson**, Gran Bretaña

## INTRODUCCION

Desde hace ya algunos años la Comisión CIB W60, «el Concepto de Rendimiento en la Construcción», se enfrenta con el problema de cómo tratar el tema de durabilidad, o rendimiento con el tiempo, dentro del concepto de rendimiento. Las cuestiones claves deben ser cómo tratar los aspectos a largo plazo del rendimiento, ya sea para el proyecto o para el mantenimiento en sí dentro de una especificación sobre dicho rendimiento y cómo considerar esta característica al evaluar las diversas posibilidades de satisfacer las exigencias planteadas.

A lo largo de conversaciones dentro de la Comisión, en el año 1981, se puso de relieve que otras muchas organizaciones habían prestado un interés a largo plazo por la durabilidad, que se realizaron muchas investigaciones y se obtuvieron nuevos conocimientos acerca de los efectos de diversos factores ambientales y del mantenimiento sobre la durabilidad de una serie de materiales y de soluciones de proyecto. No obstante, dentro del contexto del rendimiento, la Comisión opinaba que los materiales en sí, aunque representan un factor importante, no es el único, y que se podrían realizar mayores progresos si se analizara el tema con vistas a hacerlo más manejable. Reconoció asimismo que, además de las propiedades inherentes de los materiales, el proyecto, las condiciones particulares de uso y el mantenimiento realizado eran factores que presentaban una importancia considerable para determinar la durabilidad. Reconoció que la durabilidad efectiva del mismo producto sería diferente en situaciones distintas como son las diferencias en los aspectos climato-

lógicos, la incidencia y rudeza de desgaste y uso, así como las probabilidades y riesgo de daños accidentales.

La Comisión W60 opinaba que, considerando la durabilidad bajo uno de estos aspectos, sería posible ordenar las ideas acerca de cómo tratar el problema y por este motivo se decidió organizar un simposio especial de un solo día de duración para estudiar el tema.

Como consecuencia de lo anterior, durante el Tercer Simposio Internacional sobre el Concepto de Rendimiento celebrado en Lisboa en marzo de 1982, quedó claro que mientras que muchos aspectos relativos al rendimiento podían tratarse de forma razonablemente adecuada, el problema de la durabilidad seguía siendo el aspecto del rendimiento que mayor atención requería (1).

## SIMPOSIO SOBRE DURABILIDAD

El simposio sobre durabilidad se celebró en Escocia en junio de 1982; se presentaron nueve ponencias en las que se trató desde los consejos hasta la ingeniería civil y en cómo tener en cuenta la durabilidad, así como de las experiencias recogidas en la evaluación de la durabilidad bajo exposición a agentes externos (2). La discusión sobre estas ponencias resultó muy útil para clarificar varios puntos:

1. Quedó perfectamente claro que una característica del diseño de una construcción puede modificar las tensiones soportadas por un componente particular (por ejemplo haciendo que una exposición a la intemperie pase de rigurosa a protegida) y que el diseño del componente puede influir en su aptitud para resistir los esfuerzos; asimismo el diseño, ya sea de un edificio o de un componente particular puede tener fácilmente gran influencia en la facilidad con que se puede realizar el mantenimiento y puede afectar por consiguiente la minuciosidad del mismo. Por lo tanto se consideró que el diseño es por lo menos tan importante como las propiedades del material a la hora de influir en la durabilidad.
2. Se vio claramente que sería preferible considerar la durabilidad de los componentes en lugar de la de las construcciones completas ya que, dentro de una construcción dada, los diversos componentes se verán afectados de modos distintos y pueden deteriorarse con ritmos diferentes y por razones distintas.

3. Se vio asimismo claramente que la ejecución y particularmente la supervisión de la ejecución debe considerarse como un factor importante a la hora de tener en cuenta el diseño, ya que está comprobado que tiene repercusiones importantes en diversos aspectos del rendimiento y en algunos casos particularmente en la durabilidad; esto es lo que arrojan los resultados de algunos estudios de efectos observados en las construcciones durante la obra.
4. La importancia de la interacción de las propiedades del material con el diseño se vio claramente al considerar los problemas de la durabilidad en sistemas de techos invertidos, fachadas y en tubos plásticos.
5. En relación con el mantenimiento, se puso de manifiesto, al evaluar un diseño particular, aparte de las consideraciones normales acerca de la importancia y frecuencia de mantenimiento necesario, que la facilidad de mantenimiento o de reposición tenía que reconocerse como un factor muy importante.
6. Finalmente se reconoció que debido al coste de las pruebas de durabilidad para gran parte de los materiales y elementos, y teniendo en cuenta la gran cantidad de factores potenciales que pueden producir una caída en el rendimiento con el tiempo, resulta necesario ser selectivo a la hora de decidir qué diseños determinar para contrarrestar los esfuerzos existentes. Sería también deseable introducir, al determinar los requisitos de durabilidad, una medida de selectividad que permitiera una concentración en aquellos aspectos que puedan tener mayor importancia para la situación particular.

## UN MARCO PARA ESPECIFICAR Y EVALUAR LA DURABILIDAD

Se discutió largamente acerca de qué marco podía encontrarse que permitiera considerar estos diversos factores de modo sistemático. El reconocimiento de la interacción íntima entre los materia-

les, el diseño y la situación de aplicación significa que al considerar la idoneidad de soluciones particulares de diseño para una situación dada, será necesario considerar una alternativa entre los beneficios y los problemas potenciales o introducir un estudio sobre el perfil de comportamiento. Muchos miembros pensaron que se simplificaría la cuestión si se pudieran exponer los requisitos de durabilidad en una forma que proporcionara una guía para la evaluación sistemática de soluciones potenciales, y esto podría realizarse de modo más adecuado reconociendo los diversos tipos de agente que pueden producir el deterioro, aquellos debidos a factores ambientales y los producidos por las actividades humanas (tanto uso normal como accidental) y sus implicaciones para el mantenimiento.

Si se pudieran definir los requisitos utilizando el método desarrollado por la Comisión y que se reproduce en el informe CIB n.º 64 (3) esto podría suponer un punto de referencia a la hora de considerar la idoneidad de varias soluciones para el diseño desde el punto de vista de la durabilidad (Figuras 1 y 2). La subdivisión en la Figura 2 es que la importancia relativa de los diferentes agentes variará con la situación de uso y con el com-

FIGURA 1.—DESCRIPCION DE DESIGNACIONES DE NIVELES LIGADOS

Nivel K:	Por regla general un rendimiento inaceptable.
Nivel L:	<b>Aceptable.</b> Un rendimiento comparativamente bajo que puede ser sin embargo completamente satisfactorio si no se necesitan requisitos más estrictos.
Nivel M:	<b>Bueno.</b>
Nivel N:	<b>Excelente.</b> Un rendimiento comparativamente elevado que no es necesariamente extravagante pero que puede requerirse cuando los esfuerzos son grandes.
Nivel O:	Un rendimiento posiblemente demasiado elevado (y costoso) excepto en los casos en los cuales deben satisfacerse requisitos muy especiales.

Procedente de: Comisión CIB W60 Documentos de Trabajo «El Significado Relativo de los Diversos Requisitos de Rendimiento».

FIGURA 2.— UN METODO DE APROXIMACION PARA ENUNCIAR REQUISITOS CONSIDERANDO LOS AGENTES DE DETERIORO.

Agentes de deterioro	Requisito de durabilidad en niveles ligados		
	L	M	N
ESFUERZOS NATURALES <i>Ejemplo:</i> radiación Uv lluvia batiente erosión por arena temp. extremas	No importante No importante No importante No importante	→ → → →	Resistente Estanco al agua Resistente Estable
ESFUERZOS DERIVADOS DE ACTIVIDADES HUMANAS <i>Ejemplo:</i> Abrasión Manejo frecuente Fuerzas de impacto Rayado abrasivo	No importante Reducido No importante Resistencia baja	→ → → →	Resistente Elevado Resistente Resistencia elevada

FIGURA 3.—MARCO PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DE UN COMPONENTE CONOCIDO EN CIERTAS CONDICIONES DE USO DADAS. UN EJEMPLO.

	Niveles ligados para evaluación			Categoría relevante de esfuerzo	
	L	M	N	Esfuerzos naturales	Esfuerzos derivados de activ. humanas
<b>PROPIEDADES DEL MATERIAL</b> <i>Ej.</i> a) Resistencia mecánica b) Resistencia al desgaste c) Durabilidad biológica  <b>DISEÑO</b> <i>Ej.</i> a) Compatibilidad de materiales (movimientos térmicos, corrosión, etc.) b) Facilidad de fabricación/instalación c) Requisitos especiales para almacenamiento/transporte  <b>MANTENIMIENTO</b> <i>Ej.</i> a) Requerido frecuentemente b) Facilidad de reposición c) Facilidad de ajuste	Reducida Pobre Susceptible de degrad.	→ → →	Muy fuerte Muy buena Resistente		
	Problemas inevitables	→	Enteramente compatibles		
	Muy exigente	→	Sencillo		
	Muy especializado	→	No requiere cuidado especial		
	Frecuente	→	Muy raro		
	Difícil	→	Fácil		
	Muy difícil	→	Sencillo		

ponente particular. Generalmente se necesitará una gama más amplia de requisitos (5 niveles quizás) para los agentes ambientales que para los agentes de deterioro derivados de actividades humanas. Obsérvese que mientras que para algunos agentes habrá siempre cierto nivel de requisito, aunque sea muy bajo, otros pueden tener poca importancia o ninguna en algunas categorías de uso (no requisito) o pueden resultar no del uso normal sino eventualmente como consecuencia de un accidente o un acontecimiento natural no frecuente.

Toda evaluación de las soluciones propuestas necesitará considerar las propiedades del material, las características del diseño y los aspectos del mantenimiento en relación con las condiciones de utilización final. Para cada uno de estos tres puntos habrá que considerar múltiples factores (Figura 3) algunos de los cuales serán relevantes para la resistencia a los factores ambientales, otros para la resistencia al uso y desgaste, y otros para la posibilidad de daño accidental. Nuevamente el

FIGURA 4.—PERFIL DE EVALUACION DE DURABILIDAD PARA DOS PRODUCTOS. UN EJEMPLO

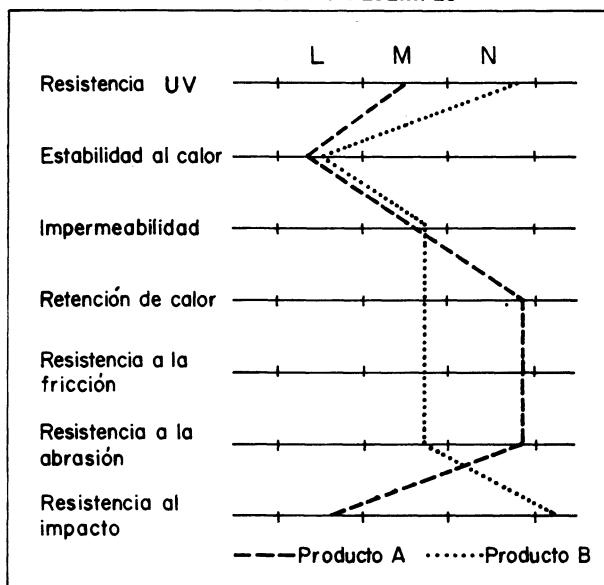


FIGURA 5.—ILUSTRACIÓN DE UNA MADERA PARA RELACIONAR LA EVALUACION DE LA DURABILIDAD CON LOS REQUISITOS DE RENDIMIENTOS ESPECIFICADOS:

Ejemplo: DURABILIDAD DE TABLAS SOLAPADAS UPVC\*

Requisitos		Evaluación del rendimiento				
Grupo de deterioro	Factor específico	Nivel de resist.	Prop. del mat.	Caracter. de diseño	Mantenimiento	Evalua. global (o perfil)
ESFUERZOS NATURALES	Resistencia U/v	N	N	—	N	N
	Estabilidad térmica	M	L	L	—	L
	Hermeticidad	N	—	M	—	M
	Retención de color	M	M	—	N	M
DESGASTE MECANICO	Fricción de rozamiento	M	M	M	N	N
	Resistencia a la abrasión	L	M	—	—	M
DAÑO ACCIDENTAL	Resistencia al impacto	N	N	N	M	N

\* UPVC : Cloruro de polivinilo no plastificado.

rendimiento puede expresarse en términos de una serie predeterminada de niveles.

Finalmente será preciso reunir las consideraciones relativas a los materiales, al diseño y al mantenimiento, y realizar una evaluación respecto de los títulos que figuran en la tabla de requisitos de uso. Esta evaluación global de la idoneidad de una solución particular o producto podrá realizarse haciendo una ponderación de los diversos factores en alguna forma reconocida o utilizando un perfil de durabilidad (ejemplo Figura 4) tal como se describe en el informe CIB n.º 64, y relacionando el rendimiento evaluado en el enunciado de los requisitos. La forma precisa de realizar lo anteriormente indicado parece plantear ciertas dificultades debido al número, potencialmente amplio, de factores que se tienen que considerar; pero la Figura 5 expone un método de aproximación que al menos parece viable. La evaluación respecto de cada título se expresa en términos compatibles con el enunciado de los requisitos.

Lo esencial de la idea consiste en exponer, para cada uno de los componentes, los requisitos y las conclusiones de la evaluación unos junto a otros. Es importante que se expresen en términos compatibles. Se supone que se utiliza en todos los casos un método de niveles ligados. La Figura 5 se refiere a un ejemplo hipotético que consiste en la evaluación de tablas solapadas de plástico upvc para uso en el Reino Unido. Se han elegido unos pocos factores específicos como ejemplos de requisitos relacionados con las tensiones ambientales, desgaste mecánico y daño accidental y se ha considerado la evaluación del rendimiento desde el punto de vista de las propiedades del material, el diseño y el mantenimiento. A partir de los resultados de esta evaluación es posible llegar a una conclusión acerca de la idoneidad global del producto particular, respecto de cada uno de los requisitos, llegando de este modo a un perfil de rendimiento. Por lo general muchas soluciones tendrán una elevada durabilidad desde algunos puntos de vista y una durabilidad reducida desde otros. Por consiguiente, será necesario hacer uso del sentido común. Las ideas expuestas aquí únicamente pueden ayudar para tomar una decisión. La evaluación global de dicho producto, en térmi-

nos de idoneidad para la situación particular de uso, dependerá de las ponderaciones relativas asignadas a cada uno de los factores de rendimiento.

Expresando niveles de rendimiento respecto de requisitos de este modo tan sencillo, resultará relativamente fácil considerar la aceptación de un rendimiento relativamente bajo para una característica cuando pueda ser compensado por un rendimiento elevado respecto de otro requisito. Por ejemplo, una estabilidad a temperatura elevada para paneles de enlace implica un requisito menos exigente respecto de la resistencia o la fricción de deslizamiento.

Si bien existe mucho juego para la discusión y las diferencias de opinión en cuanto a los detalles, la impresión general es que el método descrito aquí tendría que ser utilizado, sobre una base experimental, por varias personas para comprobar si resulta práctico aplicarlo a una amplia gama de componentes requeridos o para una amplia gama de diferentes situaciones de uso. Se está de acuerdo en que uno de los requisitos fundamentales de un sistema útil en su sencillez y que dicho sistema puede ser demasiado complicado; por lo tanto se agradece cualquier sugerencia con vistas a simplificarlo.

## AGRADECIMIENTO

Los autores quieren expresar su agradecimiento por la contribución al desarrollo de estas ideas a todos aquellos que asistieron al Simposio sobre durabilidad celebrado en junio de 1982.

## REFERENCIAS

- (1) Proceedings, Volume II. Tercer Simposio ASTM/CIB/RILEM sobre el concepto de rendimiento en la construcción, Lisboa, marzo/abril 1982.
- (2) Simposio sobre el rendimiento con el tiempo/durabilidad. Documentos de trabajo de la Comisión de Trabajo CIB W60, 28/29 de junio de 1982.
- (3) Trabajando con el método de estudio del rendimiento en la construcción. Informe N.º 64 CIB, enero de 1982.

\* \* \*

## II. PREDICCIÓN DE DURACIÓN DE VIDA ÚTIL: LAS BARRERAS Y LAS OPORTUNIDADES

**Larry W. Masters**

División de Materiales de Construcción.  
Centro de Tecnología de la Construcción.  
Oficina Estatal de Normalización.  
Washington, DC USA

### INTRODUCCIÓN

Para la selección y la utilización rentable de los materiales de construcción se precisa información sobre la duración de vida útil de los mismos. Para los materiales tradicionales que más se han utilizado en la construcción, se dispone, por lo general, de cierta información de utilidad, aunque poco documentada e incompleta, sobre la duración de vida útil real. No se dispone, en cambio, de información alguna basada en experiencias anteriores, sobre materiales nuevos o de sustitución, ni sobre materiales tradicionales utilizados en nuevos contextos. Si se tienen que reducir al mínimo los plazos para la utilización de nuevos materiales potencialmente satisfactorios o de materiales tradicionales de nuevos contextos la duración de vida útil deberá predecirse a partir de información obtenida de ensayos a corto plazo.

Se han desarrollado muchos métodos de ensayo normalizados y no normalizados con vistas a generar la información necesitada para predecir la duración de vida útil. Si bien estos métodos de prueba resultan frecuentemente útiles para comparar las durabilidades relativas de los materiales elegidos, resultan raras veces adecuados para predecir de modo fiable la duración de vida útil.

La necesidad de incrementar el estado de conocimientos en el campo de la predicción de la duración de vida útil y, por lo tanto, de reducir las barreras opuestas a la innovación y mejorar la selección de materiales rentables ha estimulado a varios grupos de investigación internacionales. Entre éstos se encuentran la Primera y Segunda Conferencia Internacional sobre la Durabilidad de los Materiales de Construcción y Componentes celebradas en 1978 y 1981 respectivamente, la Tercera Conferencia Internacional prevista para 1984 en Helsinki y la formación de una nueva Comisión de Trabajo Conjunta CIB/RILEM (Comité Técnico) para la Predicción de la Duración de Vida Útil de Materiales de Construcción y Componentes (CIB W80/RILEM 71-PSL). Asimismo, la formación de centros multinacionales de investigación de la

duración de vida útil, tales como el estudio finalizado recientemente por los países nórdicos, es un ejemplo del gran interés internacional que despierta este importante sector de investigación.

Como la predicción de la duración de vida útil presenta interés internacionalmente y la investigación requerida para hacer avanzar nuestros conocimientos es compleja, costosa y de larga duración, es imperativo que prosigan las actividades internacionales como las mencionadas anteriormente. Sin perder de vista la necesidad de una cooperación internacional, el presente artículo pretende identificar algunas de las barreras técnicas principales y precisar las oportunidades de investigación que se ofrecen a los grupos internacionales cuyo objetivo consiste en obtener predicciones fiables de duración de vida útil.

### BARRERAS TÉCNICAS A LA PREDICCIÓN DE LA DURACIÓN DE VIDA ÚTIL

Para sortear el obstáculo de las barreras técnicas fundamentales a la predicción de duración de vida útil se precisa:

- 1) un marco sistemático para tratar el problema,
- 2) un sistema eficaz de obtención y presentación de información sobre el rendimiento actual in situ de los materiales,
- 3) conocimiento de los mecanismos de degradación,
- 4) conocimientos de los factores ambientales que producen la degradación,
- 5) posibilidad de simular o tener en cuenta la acción conjunta de varios factores de degradación y
- 6) modelos matemáticos que describan el comportamiento del material en contextos o aplicaciones específicas.

A continuación se tratará de estas barreras.

#### Necesidad de un Marco Sistemático para tratar el problema

Gran número de investigadores han propuesto marcos sistemáticos que se encarguen de la predicción de la duración de vida útil y, en cierto modo, dichos marcos ya se utilizan en laboratorios o países específicos. Pero a nivel internacional no existe ningún marco de este tipo.

La falta de un marco, aceptado a nivel internacional, para tratar sistemáticamente el problema de la predicción de la duración de vida útil produce gran número de problemas. Dificulta la comunicación entre los participantes pertenecientes a grupos de investigación conjunta; impide a los investigadores articular las diversas partes de su investigación de forma clara y concisa; reduce la oportunidad de identificar y compartir información disponible para incluirla en el desarrollo de nuevos métodos o métodos revisados de ensayo; e impide la identificación de las necesidades de investigación. Aunque se han formulado gran número de marcos sistemáticos, a continuación apuntaremos tres propuestas para ilustrar los posibles enfoques del problema.

RILEM TC 60-CSC ha considerado un marco de este tipo en «corrosión de acero y hormigón». El marco apunta a la necesidad de: 1) definir la carga (es decir, estructural, ambiental) y los parámetros importantes de rendimiento; 2) elaborar la investigación científica básica realizada sobre materiales para comprender y modelar matemáticamente las interacciones tanto físicas como químicas, y 3) formular modelos matemáticos simplificados para los proyectos. Mientras que el marco ha sido desarrollado para problemas específicos con los que se enfrentaba TC 60-CSC, los pasos apuntados en el marco pueden aplicarse en general a otros problemas de predicción de duración de vida útil.

Otro marco que ha sido tratado por CIB W60 en el «concepto de rendimiento en la construcción» esboza un concepto para subdividir los diversos aspectos de durabilidad en cuatro categorías: 1) naturaleza del material; 2) consideraciones relativas al diseño; 3) condiciones en la práctica, y 4) mantenimiento. Este marco proporciona un medio sistemático de desarrollar un «perfil de durabilidad» basado en la consideración de información procedente de las cuatro categorías y pretende

servir de ayuda en el proceso de selección de los materiales. Por ejemplo, la naturaleza del material puede clasificarse desde los dos extremos de «perecedero» hasta «imperecedero» en condiciones específicas de utilización; el proyecto (diseño) se puede calificar desde «malo» hasta «excelente»; las condiciones prácticas pueden considerarse como «rigurosas» hasta «ligeras» y el mantenimiento puede calificarse desde «nunca» hasta «frecuente». En la Figura 1 se reproduce una tabla preparada por la Comisión de Trabajo W60 para presentar la información de modo claro y conciso.

Se presenta un tercer marco sistemático en «Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM)» Método E632-81, práctica para el desarrollo de ensayos acelerados para ayudar a predecir la duración de vida útil de componentes y materiales de construcción. Este marco se divide en cuatro partes: Definición del Problema, Ensayo Previo, Ensayo, e Interpretación y Comunicación de la Información. La práctica muestra, en particular, la necesidad de conocimientos sobre:

- 1) características críticas de rendimiento que pueden servir de indicadores de la degradación,
- 2) la magnitud y tipo de factores que pueden causar la degradación, y
- 3) los mecanismos de degradación.

En la práctica se reconoce también la necesidad de modelos matemáticos que ayuden a predecir la duración de vida útil.

Aunque estos ejemplos de marcos sistemáticos ilustran de algún modo diversos modos de enfoque, es importante observar sus puntos comunes que son:

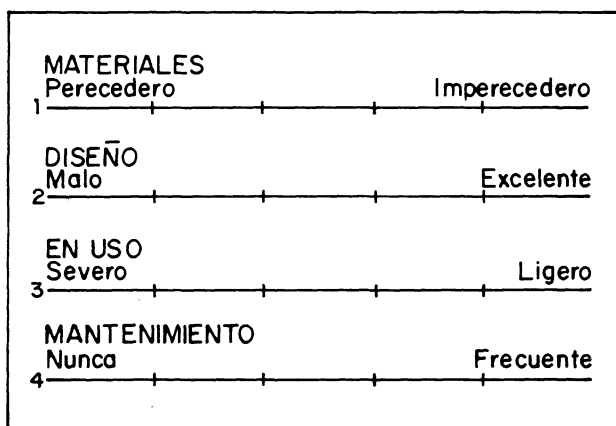
- 1) necesidad de comprender los procesos básicos por los cuales los materiales se degradan y
- 2) la necesidad de caracterizar el medio dentro del cual se utilizan los materiales.

En dos de los tres marcos se señala explícitamente la necesidad de modelar matemáticamente los procesos de degradación.

#### Necesidad de Información sobre el rendimiento en servicio

Según señaló Sneek un elemento importante que frecuentemente falta en los estudios sobre la duración de vida útil es la información sobre el rendimiento de los materiales en servicio. La falta de un mecanismo eficaz para obtener y comunicar información sobre el actual rendimiento en servicio de materiales es debida a los problemas existentes en:

FIGURA 1.—TABLA PROPUESTA POR CIB W60 SOBRE EL CONCEPTO DE RENDIMIENTO EN LA CONSTRUCCIÓN, PARA FACILITAR INFORMACIÓN SOBRE LA DURABILIDAD



- 1) la difusión, en un formato común, de la información disponible,
- 2) la identificación de los mecanismos de degradación en condiciones de uso,
- 3) la caracterización de las diversas condiciones de intemperie,
- 4) la identificación del efecto de los diversos medios ambientales en los cuales se usan internacionalmente los materiales y
- 5) la validación de modelos predictivos.

Aunque muchos países disponen de procedimientos normalizados para realizar pruebas de intemperismo en el exterior, estos métodos no disponen de realimentación (reutilización) a partir de los materiales en condiciones de uso. En su informe a RILEM Sneek recomendaba que se estableciera una colaboración para obtener un sistema eficaz de realimentación y que se aceleraran los trabajos tendientes a desarrollar métodos para estudiar el estado de las construcciones y estructuras existentes.

#### **Necesidad de conocimiento relativo a los mecanismos de degradación**

La falta de realimentación de la información sobre los rendimientos en servicio ha impedido, en gran parte, conocer los mecanismos por los cuales los materiales se degradan. La falta de conocimientos sobre los mecanismos de degradación presenta un problema a la hora de proyectar y desarrollar mejores pruebas a corto plazo. Si se pretende que las pruebas a corto plazo faciliten información fiable para las predicciones de la duración de vida útil, será esencial que dichas pruebas a corto plazo tengan en cuenta los mecanismos de degradación actualmente encontrados en el servicio. Por lo tanto es esencial conocer los mecanismos de degradación.

Los mecanismos de degradación pueden identificarse a nivel micro o macroestructural. Por ejemplo, RILEM TC-60 CSC está intentando desarrollar modelos microestructurales que reflejen los procesos fundamentales de la corrosión del acero dentro del hormigón; estos procesos incluyen carbonatación en acero fisurado y no fisurado, difusión de cloruros, iniciación de la corrosión y crecimiento. Asimismo, en su estudio sobre la degradación que se produce debajo de la superficie de los revestimientos protectores del acero, Thomas and McKnight están intentando identificar los procesos microestructurales que conducen a la formación y crecimiento de burbujas con el fin de validar modelos predictivos. Pero la identificación de los mecanismos a nivel microestructural requiere a menudo conocimientos por lo general no disponibles y que resulta difícil y lento obtener. Por estos motivos, la identificación de los meca-

nismos a nivel macroestructural puede ayudar a proporcionar los datos necesarios para el desarrollo de métodos de prueba. Pueden ser ejemplos de estos mecanismos: degradación térmica, fragilidad, pérdida de adherencia, pérdida de plastificante y degradación hielo-deshielo.

#### **Necesidad de conocimientos acerca de los factores que causan la degradación**

La degradación de los materiales de construcción puede ser producida por una amplia gama de factores. Según lo muestra el estudio nórdico, se han adoptado diversos modos de enfoque para categorizar estos factores (o agentes) de degradación. Por ejemplo ASTM E632 los relaciona en las siguientes categorías: factores atmosféricos, biológicos, de carga, incompatibilidad y de uso. Independientemente de las categorías específicas utilizadas, se reconoce:

- 1) Los factores que causan la degradación son numerosos,
- 2) La importancia de los factores varía con el material en cuestión y
- 3) Es preciso conocer el efecto de los factores y la importancia (o intensidad) de los mismos para desarrollar pruebas a corto plazo (u otras) y para predecir la duración de vida útil. El artículo de Ashton y Sereda trata de la importancia del microambiente en la degradación de los materiales y sugiere que se midan los parámetros siguientes del microambiente: temperatura superficial, humedad superficial (tiempo de humedad), estado casi saturado del material poroso y condiciones de temperatura de congelación, deposición total de contaminantes sobre superficies expuestas y dosis de radiación ultravioleta. El estudio nórdico contiene un excelente resumen de las actividades internacionales relativas a medida e información de factores climatológicos así como a los esfuerzos realizados para clasificar los climas. El informe concluye con la siguiente frase: «es necesario analizar macro-meso y micro-climas, y su interdependencia».

#### **Necesidad de la posibilidad de simular o tener en cuenta la acción conjunta de varios factores de degradación**

Las pruebas a corto plazo, particularmente las que utilizan envejecimiento acelerado, están generalmente pensadas para evaluar el efecto de un pequeño número de factores de degradación. Si bien estas pruebas pueden ser útiles para analizar o clasificar materiales, sólo tienen una validez limitada cuando se pretende predecir con ellas la duración de vida útil. Los factores de degradación pueden actuar entre sí para incrementar la velocidad de degradación o, menos frecuentemente, para



reducir dicha velocidad anulando uno de los factores los efectos de otros. La interacción sinérgica entre los factores de degradación complica las predicciones de duración de vida útil basadas en la información proporcionada por pruebas a corto plazo ya que resulta difícil simular y dar cuenta de dichas acciones sinérgicas. Un ejemplo de investigación en la que se estudian las acciones sinérgicas de los factores de degradación es el estudio de Fukushima sobre el efecto de la luz ultravioleta y el oxígeno sobre los polímeros. Utilizando análisis teóricos basados en la dinámica de estados inestables y en datos experimentales, Fukushima modelizó los procesos de degradación sinérgica en función de la profundidad a partir de la superficie.

### Necesidad de modelos matemáticos

Los modelos matemáticos que describan el comportamiento de los materiales de construcción en medios ambientes o aplicaciones específicas constituyen un elemento esencial para la predicción de la duración de vida útil. La necesidad de modelos predictivos se reconoce cada vez más en las investigaciones fomentadas por CIB y RILEM. Esto se ilustra por ejemplo en las actividades de RILEM TC-60 CSC sobre «corrosión de acero en hormigón» y RILEM TC-50 FMC sobre «mecánica de fracturas en hormigón». La investigación necesita que se sigan desarrollando los modelos predictivos, pero dichos modelos deben basarse en una comprensión de los mecanismos de degradación y de los factores que causan la misma.

### OPORTUNIDADES PROCEDENTES DE LAS BARRERAS

Aunque las barreras descritas anteriormente opuestas a la predicción de la duración de vida útil son muy grandes, también suponen un reto en el sentido de hacer progresar la tecnología de la predicción de duración de vida útil.

La formación de una Comisión de Trabajo conjunta CIB/RILEM (Comité Técnico) sobre predicción de duración de vida útil de materiales y componentes de construcción (CIB W80/RILEM 71-PSL) constituyen un paso importante en respuesta a algunos de estos retos. Los fines de esta actividad son los siguientes:

1. Identificar metodologías para predecir la duración de vida útil de los materiales y componentes utilizados en la capa exterior de las construcciones.
2. Identificar zonas para la mejora de metodologías existentes y estimular nuevos desarrollos.
3. Desarrollar metodologías sistemáticas para la predicción de duración de vida útil de materiales y componentes de construcción y difundir información sobre el estado actual de la profesión.

En 1983, la Comisión de Trabajo piensa elaborar dos informes: uno de ellos sobre las metodologías sistemáticas con las que se pueden desarrollar pruebas predictivas mejoradas y otro sobre el estado de la profesión. Este último incluirá una relación de las necesidades en la investigación. Basándose en el primer informe anteriormente mencionado, se ha previsto elaborar recomendaciones para un marco sistemático tendente a desarrollar pruebas mejoradas a corto plazo. Estas recomendaciones responderán por consiguiente a la primera barrera citada en la sección anterior de este artículo y proporcionarán un modo de aproximación que podrá utilizarse en todas las actividades que incluyan la duración de vida útil como parte del propósito. Se programarán actividades de investigación ulteriores basadas en los resultados del informe sobre el estado de la profesión y en los intereses de los miembros.

La barrera, «necesidad de información sobre el rendimiento de servicio», ofrece la oportunidad de desarrollar un mecanismo internacional para obtener y comunicar información sobre el rendimiento actual en servicio de los materiales de construcción. El Architecture and Engineering Performance Information Center (AEPIC), que se formó en 1982 en la Universidad de Maryland (USA) podrá contribuir a satisfacer esta necesidad. El objetivo fundamental de AEPIC es la prevención de fallos estructurales y debidos al material. Parte de la base de que la recogida sistemática, cotejo, análisis y difusión de la información sobre dichos fallos contribuirá a alcanzar el objetivo previsto. Pero a pesar de la formación de AEPIC, sería difícil la realización de un sistema eficaz de obtención y difusión de información en un breve periodo de tiempo. Uno de los problemas que hay que resolver es que a pesar de disponer de información, ésta no se adapta fácilmente a un formato uniforme de presentación. Otro problema deriva de las muchas lagunas en la información disponible y de las innumerables cuestiones relativas a la historia actual en curso. Debido a las dificultades para obtener y facilitar información disponible, quizás fuera más adecuado y deseable desarrollar una práctica normalizada a través de la cual pudiera obtenerse y facilitarse sobre una base internacional, la futura información sobre el rendimiento en servicio.

Los recientes progresos de instrumentación científica y tratamiento de la información permitirán a los investigadores caracterizar más fácilmente los materiales y sus mecanismos de degradación. Por ejemplo las herramientas para la caracterización de superficies como la espectroscopía electrónica para análisis químico (ESCA) la espectroscopía Auger y la microscopía electrónica resultan valiosas para estudiar la degradación de las superficies. Estas y otras herramientas analíticas permiten obtener nuevos conocimientos acerca de los mecanismos de degradación y del efecto de las acciones sinérgicas de degradación.



Se están realizando muchas actividades para satisfacer la necesidad de nuevos conocimientos, acerca de los factores que producen la degradación. Algunas de éstas son por ejemplo: CIB W71 sobre «Climatología para construcción», ISO/TC sobre «Información climatológica para proyectos de construcción», así como las investigaciones sobre degradación de materiales realizadas por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization of Australia (CSIRO) y el National Research Council (Canadá). Además de medir y clasificar factores climatológicos es necesario medir otros factores que pueden producir la degradación de los materiales de construcción.

Otra posibilidad de investigación consiste en la necesidad de modelos matemáticos. Estos modelos pueden ser deterministas o probabilistas. Según señala Martín, la ecuación generalizada para envejecimiento acelerado basada en la teoría de probabilidades se puede expresar como

$$F_i(t) = F_o(t) \cdot p_i(t)$$

donde  $F_i(t)$  es la distribución de vida (duración) al nivel de tensión acelerada.  $F_o(t)$  es la distribu-

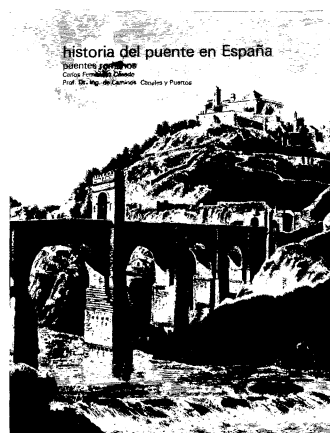
ción de vida al nivel de tensión en servicio; y  $p_i(t)$  es la función de transformación temporal. La utilización de la teoría de probabilidades como una herramienta para la investigación puede ser útil en la predicción de duración de vida útil de materiales de construcción y en el desarrollo de modelos matemáticos útiles y de amplia aplicación.

## CONCLUSIONES

La necesidad de hacer progresar el estado de la predicción de la duración de vida útil de materiales de construcción ha despertado gran interés, recientemente, en grupos nacionales e internacionales. Las barreras técnicas para satisfacer las necesidades de predicciones mejoradas son numerosas e importantes. A su vez, dichas barreras ofrecen la oportunidad de mayores y más continuadas interacciones internacionales así como la posibilidad de realizar investigaciones sobre los materiales de construcción y sus procesos de degradación. La formación de CIB W80/RILEM 71-PSL es un ejemplo de organizaciones internacionales que responden a estos retos.

\* \* \*

## publicación del I.e.t.c.c.



## historia del puente en España puentes romanos

**Carlos Fernández Casado**  
Prof. Dr. Ing. de Caminos,  
Canales y Puertos

Unos apéndices añadidos a los doce artículos originales informan sobre las variaciones experimentadas por algunos puentes más importantes como la del traslado de las ruinas mejor conservadas del puente de Alconétar, que corrió el peligro de quedar sumergido en el embalse de Alcántara, y la reparación de la cimentación de una de las pilas centrales del puente de este mismo nombre que fue detectada, al quedar durante unos días cortado el curso del Tago, para realizar el montaje de los desagües de fondo correspondientes a la presa del citado embalse.

Un volumen encuadernado en cuche, a dos colores, de 21 x 27,5 cm, compuesto de 554 páginas, 105 grabados, 14 dibujos, 753 fotos blanco y negro, 24 fotos color y 110 dibujos de línea.

Madrid, 1981.

Precios: España, 3.000 ptas.; extranjero, 43 \$ USA.

Se han reunido en esta publicación doce artículos que fueron apareciendo durante 25 años en la Revista «Informes de la Construcción», a partir del mes de marzo de 1955. El propósito era mucho más ambicioso pues se trataba de hacer una «Historia del puente en España», pero hasta el momento actual sólo se ha revisado la época romana, si bien el autor tiene la intención de prolongar la historia hasta cuando sus años de vida le den lugar.